# 利用 ENFA 生态位模型分析玉带凤蝶和箭环蝶异地放飞的适生性

杨　瑞,张雅林,冯纪年*

(西北农林科技大学植保资源与病虫害防治教育部重点实验室,西北农林科技大学昆虫博物馆,陕西杨凌　712100)

摘要:活体蝴蝶异地放飞存在潜在的入侵风险。本文采用生态位因素分析(ENFA)模型分析包括气候、地形、生境结构、植被类型、人类活动在内的影响玉带凤蝶 *Papilio polytes* Linnaeus 和箭环蝶 *Stichophthalma howqua* (Westwood) 两种放飞蝴蝶分布的生态地理变量,模拟其在中国的适宜生境,评估其入侵风险。对现有分布记录的分析表明:影响这两种蝴蝶分布的主要环境变量与其生态学特性相一致,且影响其扩散范围的主要因素为年总积温和冬季低温等;同时,人类活动的干扰对其分布影响很大。根据适生性图推测,这两种蝴蝶的适宜生境大部分重叠,主要集中在中国大陆中部及东南部,其扩散趋势由东南向西北发展。为防止活体蝴蝶放飞带来的潜在入侵风险,根据不同适生等级提出:HSI≥50 的地方,不能开展室外放飞;5≤HSI<50 的地方,可采取限制性室外放飞;HSI<5 的地方,可进行自由室外放飞。

关键词:玉带凤蝶;箭环蝶;异地放飞;生态地理变量;生境适宜性;生态位因素分析

中图分类号:Q968　　文献标识码:A　　文章编号:0454-6296(2008)03-0290-08

# Habitat suitability analysis in live releasing of two butterflies *Papilio polytes* Linnaeus and *Stichophthalma howqua* (Westwood) in China using ENFA

YANG Rui, ZHANG Ya-Lin, FENG Ji-Nian* (Key Laboratory of Plant Protection Resources and Pest Management, Ministry of Education and Entomological Museum, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract**: Live butterflies releasing in non-native range may bring about invasive risk. Based on the Ecological Niche Factor Analysis (ENFA), we modeled the potential distribution of *Papilio polytes* Linnaeus and *Stichophthalma howqua* (Westwood) in China and studied the ecogeographical determinants underlying their spatial response, including climate, topography, vegetation, habitat structure and human impact. The results indicate that the main environments which limited the distribution of the two butterflies are corresponding with their ecosystem characteristics mutually, and the factors that influenced the range niche of the two butterflies are annual accumulated temperature and low winter temperature. Human disturbance plays an important role in the distributing range of the species. According to the habitat suitability map, the suitable areas of the two butterflies are overlapped, which are mainly concentrated in the central part and the southeast of mainland China with the spreading tendency from southeast to northwest. Based on habitat suitability index, we proposed feasible strategies to prevent from invasive risk: when HSI≥50, the two butterflies should not be released outdoors; if 5≤HSI<50, limited outdoors releasing of the two butterflies could be carried out; and if HSI<5, live butterflies of the two species could be released in the open air and introduced into new territories.

**Key words**: *Papilio polytes*; *Stichophthalma howqua*; releasing in non-native range; ecogeographical variables (EGVs); habitat suitability; Ecological Niche Factor Analysis (ENFA)

---

基金项目:国家自然科学基金项目(30570205);国家科技基础条件平台建设子项目(2005DKA21105);陕西省攻关项目(2007K01-08)

作者简介:杨瑞,女,1982 年生,辽宁人,硕士研究生,研究方向为农业昆虫, E-mail: ruiy@nwsuaf.edu.cn

* 通讯作者 Author for correspondence, Tel.: 029-87092090; E-mail: jinianf@nwsuaf.edu.cn

收稿日期 Received: 2007-09-13;接受日期 Accepted: 2007-12-20

外来物种的入侵常常对本地生物多样性和生态系统的稳定性造成威胁。随着城市化进程的日益加快,蝴蝶生态观赏作为一种全新的休闲方式越来越受到欢迎,对活体蝴蝶的需求也越来越大。大多数所需蝴蝶主要来自热带和亚热带地区的人工养殖园(史军义等,2005),按照外来物种划分标准,当蝴蝶离开原产地被带到异地进行放飞时就成为外来物种。同时,如果在放飞地存在蝴蝶生存的适宜气候条件、寄主及蜜源植物,而又缺乏有效的天敌,这些放飞个体就有可能在当地建立种群,进而改变或威胁本地生物多样性,破坏本地生境。

蝴蝶放飞的主要形式是利用活体在节庆、婚礼放飞,在封闭式观赏园放飞,或野外增补种群时放飞。目前国内用于放飞的蝶种大约有 33 种,分属于 5 科 16 属(史军义等,2005)。研究放飞蝴蝶的适宜生境,不仅可以了解蝴蝶的生态位,同时可根据蝴蝶的适生等级,为经营者饲养,管理者引入、放飞蝴蝶提供科学依据。由于蝴蝶种类繁多、放飞目的多样及放飞地点不确定性,同时存在危害林木及经济作物的潜在风险,难以开展野外试验方法确定放飞蝴蝶的适宜生境。

本文结合物种的存在数据(presence-only data)与生态地理变量(ecogeographical variables,EGVs)(包括生物及非生物因素在内的气候、地形、生境结构、植被类型和人类活动 5 类变量),应用生态位因素分析(Ecological Niche Factor Analysis, ENFA)模型,通过模型模拟物种的生态需求,对影响玉带凤蝶 *Papilio polytes* Linnaeus 和箭环蝶 *Stichophthalma howqua* (Westwood) 2 种放飞蝴蝶分布的环境变量进行分析,从而生成物种分布的适生性图(habitat suitability map,HS map),模拟 2 种蝴蝶在中国的适宜生境,并通过研究物种生态位(ecological niche)的特征,了解 2 种蝴蝶在中国的分布区,确定最佳适生区和分布界限,为人工放飞及生物多样性保护提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 原理

ENFA 模型是基于 Hutchinson(1957)的生态位的定义,把生态位描述为球形的多维度(multi-dimensional)环境梯度空间中,一个生物单位生存条件的总集合体(Hirzel *et al*., 2002a)。在单一因子的梯度分布上,可以计算物种在此梯度分布的平均值(mean)和标准偏差(standard deviation,STD)。平均值表示此物种对该因子适应的平均状态,标准差则表示该物种对此因子适应的忍受程度(tolerance)。

ENFA 就是应用上述生物正态分布的平均值和方差的观念,利用物种的发生数据和一系列生态地理变量,将研究物种的生态位和生态位幅度与整个研究区域的环境因子的平均状态和变异相互比较,从而计算物种适生性模型(habitat suitability model, HS model)。ENFA 模型已成功模拟了许多物种的生境适宜性,包括鸟类(Braunisch and Suchant,2007)、海洋生物(Bryan and Metaxas,2007)、爬行动物(Santos *et al*.,2006)、两栖动物(Soares and Brito,2007)、昆虫(Gállego *et al*.,2004)、植物(Zaniewski *et al*.,2002)、哺乳动物(Cassinello *et al*.,2006)等。

### 1.2 研究对象

玉带凤蝶 *P. polytes* L.和箭环蝶 *S. howqua* (West.)的自然地理活动范围较窄(表 1),幼虫常以林木及经济作物为食。其中玉带凤蝶幼虫主要取食桔梗、柑橘类等芸香科植物的叶片,危害严重时可造成巨大的经济损失。箭环蝶取食毛竹等植物,在浙江余姚等地大面积发生达 200 $hm^2$(李百万等,2005)。2 种蝴蝶在各自的分布所在地也一直被当作农业生产上的害虫。

**表 1 玉带凤蝶和箭环蝶放飞蝴蝶的自然分布及危害寄主**

**Table 1 The natural distribution and host plants of two butterflies *Papilio polytes* L. and *Stichophthalma howqua* (Westwood)**

| 蝶种 Species | 自然分布范围 Natural distribution range | 危害寄主 Host plants |
|---|---|---|
| 玉带凤蝶 *Papilio polytes Linnaeus* | 甘肃 Gansu*,青海 Qinghai*,陕西 Shaanxi*,河北 Hebei*,河南 Henan*,湖南 Hunan*,山东 Shandong*,山西 Shanxi*,江西 Jiangxi*,湖北 Hubei,浙江 Zhejiang,江苏 Jiangsu,海南 Hainan,广西 Guangxi,四川 Sichuan,重庆 Chongqing,云南 Yunnan,广东 Guangdong,福建 Fujian,台湾 Taiwan | 芸香科 Rutaceae 柑橘属 *Citrus* spp.,花椒属 *Zanthoxylum* spp. |
| 箭环蝶 *Stichophthalma Howqua* (Westwood) | 陕西 Shaanxi*,贵州 Guizhou*,江西 Jiangxi*,湖南 Hunan*,浙江 Zhejiang,湖北 Hubei,福建 Fujian,广东 Guangdong,广西 Guangxi,四川 Sichuan,重庆 Chongqing,云南 Yunnan | 棕榈科 Palmae 棕榈属 *Trachycarpus* spp.,禾本科 Gramineae 竹亚科 Bambusoideae Nees |

* 仅具有局部零星分布的省。* Provinces only with local or sporadic distribution.

### 1.3 数据

**1.3.1 物种分布数据**：玉带凤蝶和箭环蝶的地理分布数据均来自公开发表的论文(包括万方数据库和维普数据库)、地方志及西北农林科技大学昆虫博物馆馆藏标本的采集记录。所有标本点经过核对，去除重复记录点，通过中国行政区划网(http：//www.xzqh.org/)和谷歌卫星地图(Google earth)确认行政区划并查找相应经纬度。确定 204 个玉带凤蝶分布记录和 117 个箭环蝶分布记录。

**1.3.2 环境地理变量**：根据蝴蝶的生态要求，本文使用了 5 类环境数据，共 27 个变量(表 2)，包括中国数字气象数据(于贵瑞等，2004)中的气象数据、1∶400 万中国数字高程地图(DEM)和地球系统科学数据共享网提供的1∶400万中国公路、中国河流、面积大于 10 平方公里的中国湖泊数据、中国植被数据、2000 年中国人口数据。

气象数据包括 1961 – 2000 年 30 年平均的 1 月和 7 月平均温度、降水、相对湿度，30 年的年平均温度、年总降水、年均湿度及大于 10℃积温，年总日照实数、年均太阳总辐射 12 种数据。地形数据直接从中国数字高程地图中提取，包括海拔、坡向、坡度。生境结构包括 4 种，主要分析湖泊和河流发生距离和发生频率的影响。中国植被数据按不同植被类型，分别提取每一类植被图(主要分析 5 类自然植被，包括针叶林、阔叶林、灌丛和萌生矮林、草原和稀树灌木草原、草甸和草本沼泽)，并生成该类植被的发生频率图及距离图。人类对蝴蝶分布的影响考虑了公路的分布和人口密度，公路数据处理方法同生境结构。

为确保所有数据覆盖相同的范围，具有相同的栅格大小(栅格大小为 1 km × 1 km)和投影，所有数据均预先在 ArcGIS9.0 中进行处理，并将 ArcGIS 栅格数据(ArcGIS Raster Format)转换成 ENFA 使用的栅格格式(Idrisi Grid Format)。

### 1.4 运行软件

ENFA 在 Biomapper 3.2 (http：//www.unil.ch/biomapper/)中运行。首先确定 EGVs 间的相互关系，之后建立这些变量的组合，转化为数量相等的两类不相关因子(marginality 和 specialization)，形成了计算生境适宜性的多维度环境梯度空间。第一个因子为边缘因子(marginality factor，MF)，是物种分布的平均值与研究区域整体平均值的差异，研究物种的分布偏离整个研究区域平均值的程度，显示物种的分布格局，相对于整体环境，是属于极端或是接近平均状态。MF 定义了物种生态位的位置。其他因子为特化因子(specialization factor，SF)，是研究区域环境梯度变异与物种分布变异的比值，反映出物种对于整体环境变动的忍受程度，显示物种在研究区域是广泛分布，还是特化于局部特定或稳定的栖息地中。SF 定义了物种生态位的宽度。因此，ENFA 就是通过比较整个研究区域(global distribution)与物种分布区域(species distribution)后将物种所占据的生态位数量化的过程(Hirzel *et al*.，2002a)。

在进行分析之前，所有的环境变量都要进行转换(Box-Cox transformation)和检验(verified)，经检验后删除不够连续的公路及湖泊发生频率数据。最后，将 Hsmap 导入 ArcGIS 以中国 1∶400 万国界与省级界(http：//sms.webmap.cn/下载，)为地理底图，做进一步分析。

### 1.5 模型的验证

Biomapper 3.2 基于 Boyce 等(2002)(Hirzel *et al*.，2006)方法，使用 *k*-fold 交互验证评价模型的精确性(robustness)。该方法将物种分布数据随机划分成 k 部分，每一次都使用 *k*-1 部分校正模型，剩余一部分则用来验证模型，反复重复 *k* 次，之后生成 P/E 曲线判断模型。

## 2 结果与分析

通过 MacArthur 's broken stick 方法(Hirzel *et al*.，2002b)，确定使用 4 个(≥5%)因子(2 种蝴蝶分别包括一个 marginality 因子和 3 个 specialization 因子)，建立 HS model。每一模型分别包括 91.8%(包括 100% marginality 和 83.6% specialization)(玉带凤蝶)、95.5%(包括 100% marginality 和 91% specialization)(箭环蝶)的总信息。模拟结果分别包括 1 个 factor table(表 3)和一个 HS map(图 1)。

总的来说，玉带凤蝶和箭环蝶的分布适生区与整体环境不同，且特化于局部稳定环境中，2 种蝴蝶对环境变化的忍受程度低(玉带凤蝶 global marginality = 2.168，tolerance = 1/specialization = 0.372；箭环蝶 global marginality = 2.461，tolerance = 0.230)。

表 2　ENFA 中的环境地理变量(包括类型、缩写、描述、单位、来源)

Table 2　EGVs used in the ENFA (including category, code, description, unit and data sources).

| 类型 Category | 代码 Code | 描述 Description | 单位 Unit |
|---|---|---|---|
| 气候 | Sunshi[1] | 年实际日照时数 Annual sunshine hours | h |
| Climate | Totalr[1] | 年太阳总辐射 Annual solar radiation | $MJ/m^2$ |
| (1961 – 2000 年/y) | Acctem[1] | > 10℃积温 Accumulated temperature above 10℃ | ℃·d |
| | Temjan[1] | 1 月平均气温 Mean temperature in January | ℃ |
| | Temjul[1] | 7 月平均气温 Mean temperature in July | ℃ |
| | Temyear[1] | 年平均气温 Annual mean temperature | ℃ |
| | Prejan[1] | 1 月平均降水 Mean precipitation in January | mm |
| | Prejul[1] | 7 月平均降水 Mean precipitation in July | mm |
| | Preyear[1] | 年总降水 Annual precipitation | mm |
| | Reljan[1] | 1 月相对湿度 Relative humidity in January | % |
| | Reljul[1] | 7 月相对湿度 Relative humidity in July | % |
| | Relyear[1] | 年均相对湿度 Annual relative humidity | % |
| 地形 | Altitude[1] | 海拔高度 Altitude | m |
| Topography | Aspect[1] | 坡向 Aspect | Degrees |
| | Slope[1] | 坡度 Slope | Degrees |
| 植被 | Distf11[2] | 针叶林的距离 Distance to coniferous forest | m |
| Vegetation | Distf12[2] | 阔叶林的距离 Distance to deciduous forest | m |
| | Distf13[2] | 灌丛和萌生矮林的距离 Distance to bush and coppice | m |
| | Distf15[2] | 草原和稀疏灌木草原的距离 Distance to grassland | m |
| | Distf16[2] | 草甸和草本沼泽的距离 Distance to meadow and herbaceous swamp | m |
| 生境结构 | Disriver[2] | 主要河流的距离 Distance to main rivers | m |
| Habitat structure | Dislake[2] | 面积≥10 $km^2$ 湖泊的距离 Distance to lakes over 10 $km^2$ in area | m |
| | Freriver[2] | 主要河流的发生频率 Main river frequency | % |
| | Frelake[2] | 面积≥10 $km^2$ 湖泊发生频率 Lake frequency over 10 $km^2$ in area | % |
| 人类影响 | Disroad[2] | 主要公路的发生距离 Distance to main roads | m |
| Human impact | Freroad[2] | 主要公路的发生频率 Main road frequency | % |
| | Humden[2] | 2000 年中国人口密度 Population density in 2000 | $p/km^2$ |

[1] 中国生态系统研究网络数据共享系统；[2] 地球系统科学数据共享网。[1] Data-Sharing Network of Chinese Ecosystem Research；[2] Data-Sharing Network of Earth System Science.

## 2.1　2 种蝴蝶的生态位特征

表 3 为每一生态地理变量对 MF 和 SF 的影响系数，其中 marginality 系数表明玉带凤蝶和箭环蝶的分布区主要在年总积温大，冬季低温，夏季高温，潮湿，太阳辐射弱且日照充足，年总日照实数较小的地区。玉带凤蝶对太阳辐射和日照时数的要求大于箭环蝶；前者的有效积温略大于后者；2 种蝴蝶对降水和相对湿度要求基本相同；它们分布的平均海拔为 600 ~ 1 200 m，玉带凤蝶分布海拔略高于箭环蝶。2 种蝴蝶主要栖息在离寄主或蜜源植物不远的针阔混交林、阔叶林、草原草甸附近，其中玉带凤蝶主要集中在林缘，箭环蝶主要集中在林中；人类活动对蝴蝶分布的影响也比较大，多发生在城镇周边，玉带凤蝶分布区邻近道路，但箭环蝶该系数较小(< 0.15)，分布区较远离公路。河流的发生频率与 2 种蝴蝶的发生正相关，说明水源充足的地方适合其生存。相反，坡向、坡度对于 2 种蝴蝶的 marginality 影响不大。specialization 系数表明年总积温、冬季及全年平均气温、夏季及年相对湿度是限制 2 种蝴蝶分布范围的主要因子。

## 2.2　2 种蝴蝶在中国的适生区

根据每一蝶种的 P/E 曲线，划分最佳适生区(optimal)、适生区(suitable)、亚适生区(subsuitable)、边缘区(marginal)及非适生区(unsuitable)，以适生指数(HS index，HSI)表示。最佳适生区基本包括 2 种蝴蝶的自然分布区。其中，玉带凤蝶(图 1：A)的最佳适生区(80 ≤ HSI ≤ 100)约占 5.23%，适生区(50 ≤ HSI < 80)约占 7.13%，亚适生区(30 ≤ HSI < 50)约占 8.78%，边缘区(5 ≤ HSI < 30)约占 12.02%；箭环蝶(图 1：B)的最佳适生区约占 3.55%，适生区约占 7.12%，亚适生区约占 4.97%，边缘区约占 10.85%。

### 2.2.1　玉带凤蝶：从 HS map 推测，玉带凤蝶的分布适生区包括除黑龙江、吉林外的其他省份，即 HSI ≥5。其最佳适生区主要集中在海南东北部，台湾东部，江西大部分地区，浙江、广东东北及西南部，广西北部，贵州北部，四川中东部，重庆中北部，湖南中部及东南部，福建西北及西南部，安徽南部，云南南部，湖北西南及东南小部分地区，江苏，云南、西藏南部

零星地区；适生区主要集中在浙江、贵州大部分地区，海南、福建、上海、重庆中部，广东、河南东南部，广西西北部，云南南部，江西中北部，湖南、湖北、四川中东部，安徽中南部，江苏西南部及陕西南部零星地区。亚适生区主要集中在台湾、上海、江苏、河南大部分地区，云南、贵州中部，福建东南沿海，湖南、湖北北部及南部，四川东部及南部，安徽北部，浙江、山东南部，陕西秦岭以南，西藏林芝，山西南部零星地区；边缘适生区主要分布在北京，天津，山西，河北，山东北部，陕西秦岭以北，甘肃武威以南与宁夏相连，青海小部分地区，新疆伊犁地区，辽宁大连，其余各地均有零星区域。

2.2.2　箭环蝶：箭环蝶的分布适生区略小于玉带凤蝶，包括除北京、天津、内蒙古、黑龙江、吉林、新疆、青海、宁夏外的其他省份。其最佳适生区主要集中在海南中东部，广东西部及东部，江西、福建广大地区，四川中东部，浙江、安徽、广西局部及台湾、云南、贵州、湖南、湖北、西藏林芝的零星地区；适生区主要集中在海南、重庆中部，湖南、贵州、广西大部分地区，四川、广东中部广大地区，湖北、浙江、福建局部，江苏、山西、河南南部零星地区；亚适生区主要集中在海南、广东、福建沿海，浙江大部分地区，云南南部，西藏雅鲁藏布江地区，安徽中部，江西北部，湖北中南部，湖南、广西、贵州、四川局部地区；边缘适生区主要集中在台湾、江苏、河南全境，云南中部，陕西、山东南部，河北、山西、甘肃、西藏小部分地区，其余各地均有零星区域。

## 2.3　结果准确性验证

以上结果通过交互验证，较为准确可信，2 种蝴蝶的 HS model 在低适生等级时 $P/E < 1$，随着适生等级的增加，P/E 逐渐增大 $P/E > 1$，且曲线单调递增（玉带凤蝶 Boyce Index = 0.722；箭环蝶 Boyce Index = 0.742）。

**表 3　前 4 个 MF 和 SF 及相关生态地理变量系数**

**Table 3　The first four factors and coefficients of EGVs to factors generated by ENFA**

| 生态地理变量 EGVs | 玉带凤蝶 *Papilio polytes* L. | | | | 箭环蝶 *Stichophthalma howqua* (Westwood) | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | MF(100%) SF1(21%) | SF2(45%) | SF3(11%) | SF4(7%) | MF(100%) SF1(52%) | SF2(28%) | SF3(6%) | SF4(5%) |
| Sunshi | -0.30* | 0.07 | 0.06 | 0.05 | -0.36* | 0.09 | 0.01 | 0.08 |
| Totalr | -0.23* | 0.06 | 0.05 | 0.03 | -0.29* | 0.09 | 0.01 | 0.08 |
| Acctem | 0.21* | 0.14 | 0.36* | 0.09 | 0.18* | 0.15 | 0.15 | 0.49* |
| Temjan | 0.30* | 0.64* | 0.43* | 0.21 | 0.27* | 0.67* | 0.40* | 0.44* |
| Temjul | 0.18* | 0.26 | 0.26 | 0.39* | 0.15* | 0.16 | 0.41* | 0.12 |
| Temyea | 0.27* | 0.66* | 0.72* | 0.61* | 0.24* | 0.59* | 0.79* | 0.58* |
| Prejan | 0.26* | 0.02 | 0.00 | 0.04 | 0.25* | 0.01 | 0.01 | 0.03 |
| Prejul | 0.23* | 0.01 | 0.02 | 0.03 | 0.22* | 0.01 | 0.01 | 0.03 |
| Preyear | 0.28* | 0.07 | 0.03 | 0.12 | 0.27* | 0.09 | 0.02 | 0.06 |
| Reljan | 0.21* | 0.07 | 0.14 | 0.24 | 0.24* | 0.15 | 0.02 | 0.15 |
| Reljul | 0.22* | 0.00 | 0.03 | 0.32* | 0.21* | 0.33* | 0.03 | 0.03 |
| Relyear | 0.27* | 0.20* | 0.28* | 0.41* | 0.27* | 0.34* | 0.03 | 0.11 |
| Altitude | -0.18* | 0.02 | 0.02 | 0.02 | -0.15* | 0.02 | 0.00 | 0.03 |
| Aspect | 0.03 | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.08 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Slope | 0.04 | 0.00 | 0.01 | 0.02 | 0.08 | 0.00 | 0.08 | 0.00 |
| Distf11 | -0.15* | 0.01 | 0.00 | 0.01 | -0.20* | 0.00 | 0.01 | 0.03 |
| Distf12 | -0.18* | 0.00 | 0.03 | 0.00 | -0.20* | 0.00 | 0.01 | 0.06 |
| Distf13 | -0.05 | 0.01 | 0.00 | 0.01 | -0.09 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Distf15 | 0.15* | 0.02 | 0.00 | 0.12 | 0.17* | 0.07 | 0.13 | 0.15 |
| Distf16 | 0.26* | 0.05 | 0.01 | 0.24 | 0.22* | 0.04 | 0.09 | 0.20 |
| Distroad | -0.18* | 0.01 | 0.00 | 0.00 | -0.12 | 0.00 | 0.00 | 0.01 |
| Humden | 0.17* | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.15* | 0.00 | 0.00 | 0.02 |
| Distriver | -0.11 | 0.00 | 0.03 | 0.01 | -0.10 | 0.01 | 0.00 | 0.04 |
| Distlake | 0.04 | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.07 | 0.01 | 0.02 | 0.02 |
| Freriver | 0.15* | 0.00 | 0.01 | 0.00 | 0.17* | 0.00 | 0.00 | 0.00 |

该系数说明了每一 EGV 与 MF 和 SF 间的关系（≤ -0.15 或≥0.15 有意义，用 * 表示）。该系数从 -1 到 1，正值代表物种与该 EGV 正相关，负值则表示物种与该 EGV 负相关（Hirzel *et al*.，2002a）。SF 系数只与绝对值有关，符号无意义。The EGVs making the largest contribution (≤ -0.15 or ≥ 0.15) to each factor are represented with asterisk. For the first factor, positive and negative signs indicate the preference by the species for values above and below the mean for each EGV, respectively. For the remaining factors, signs have no ecological relevance.

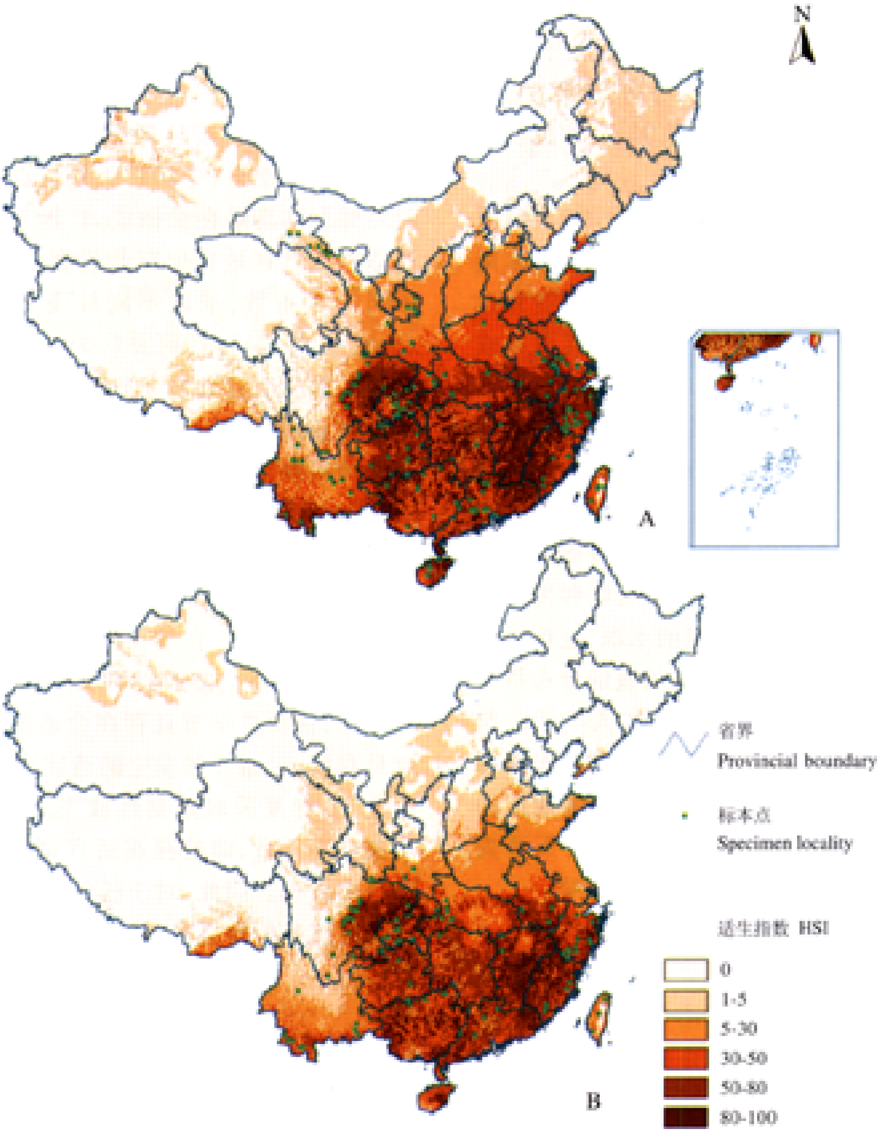


**图 1　玉带凤蝶(A)和箭环蝶(B) 2 种蝴蝶的适生分布区**

Fig. 1　Habitat suitability maps for *Papilio polytes* L.（A）and *Stichophthalma howqua*（Westwood）（B）

适生指数 HSI，0 = 低适生等级，100 = 高适生等级。The scale on the right shows habitat suitability index，0 stands for unsuitable and 100 stands for optimal.

## 3　讨论

与一般性或专家描述不同，适生性模型可以对物种的发生进行精确的空间定量描述(Hein *et al*.，2007)。ENFA 是一种基于地理信息系统(geographic information system，GIS)的功能较强的适生性分析模型，可以分析包括气象因子在内的各种影响因子，模拟物种分布的基础生态位(environmental niche)和实际生态位(observed niche)(Cassinello *et al*.，2006)；且不需要使用难以获取的"物种不存在"(absence data)区域的原始数据资料，主要通过"物种存在"(presence-only data)数据进行分析(Hirzel *et al*.，2002a)，并能与地理信息学中 GIS 的方法相结合，对物种的空间分布进行可视化分析，判断核心分布区，以渐变趋势表示不同适生等级，计算每一等级所占比例。同时，也可根据需要，利用 GIS 重新划定分布范围。本研究所使用的栅格大小 1 km × 1 km 适合研究蝴蝶的分布，可将某些重要特征区别出来，如河流、山谷等。

### 3.1　生态地理变量对蝴蝶分布的影响

本文分析了包括生物及非生物因素在内的影响蝴蝶分布的 5 类生态地理变量，结果表明多种生态地理变量的综合很好地说明了玉带凤蝶和箭环蝶的

分布现状，可以较准确地模拟蝴蝶在中国的分布适生区。这些因子包括：1）气候因子，如温度、降水、相对湿度等；2）地形变量，如海拔、坡向、坡度；3）生境结构变量，如水源的影响；4）植被因子，如植被类型；5）人类活动的影响。

各种气候因子比如年降雨量、年均气温、相对湿度、年总辐射量、年总日照时数在我国的分布由东南到西北具有明显的梯度性，因此蝴蝶的生境适宜性由东南到西北是逐渐降低的，并且温度是其分布或扩散的重要限制因子。地形变量对物种的分布有重要影响，特别是海拔对蝴蝶分布的影响显著，如 2 种蝴蝶与海拔都呈负相关分布，均分布在低海拔。同时，海拔又与气候因子密切相关，如降水和气温，因此也是由于降水的减少和温度的降低而降低其适生性。水分因子（包括降水、湖泊、河流）与物种发生正相关，说明这些地区可能存在蝴蝶的水源，也可能由于水源地带寄主及蜜源植物丰富。植被的分布格局表明蝴蝶总会出现在林缘、草原地带。人类活动与蝴蝶的分布有重要影响，可能是因为人类聚集区都较平缓、海拔低，且气候适宜，进而影响了该地区的气候、地形等；也可能是由于人类活动区有人畜粪便、腐叶烂果或栽培有适宜寄主、蜜源植物等。

### 3.2 最佳适生区和分布界限

研究发现，玉带凤蝶和箭环蝶的适宜分布区域大部分重叠，主要集中在中国东南部广大地区。根据模拟结果，没有记载的西藏雅鲁藏布江地区存在广泛的适宜生境。

玉带凤蝶的分布适宜区较大，西北的新疆、甘肃、青海、内蒙都可能适合其生存，虽然甘肃地区的适生指数较低，仅在 15 左右，但根据文献记载，该地区有玉带凤蝶采集记录，这可能是从邻近地区迁飞过去或人为传播，并在甘肃建立了种群，证明该蝴蝶的适生能力比较强。同时，由于其适宜寄主柑橘属及花椒属植物在我国长江流域以南广泛栽培，这也就增加了该蝴蝶在此区域的适生性。与玉带凤蝶不同，箭环蝶的最佳适生区和适生区较不连续，且分布范围都较玉带凤蝶小；但箭环蝶的寄主棕榈由于引种栽培至秦岭以南地区，使得该蝴蝶在北方地区存活的可能性增强。总的来说 2 种蝴蝶的最佳适生区主要分在 1 月均温较高（大于 8℃），年总积温较高（大于 5 500℃·d），年总太阳辐射较弱（小于 4 500 $MJ/m^2$），海拔较低（小于 1 200 m），年总日照时数短（2 000 h），年总降水量较高（大于 1 400 mm），年平均相对湿度较高（大于 85%）的地方。西藏、新疆、甘肃、青海、内蒙古、黑龙江、吉林、辽宁大部分地区均不适合这 2 种蝴蝶分布。

### 3.3 放飞策略

玉带凤蝶和箭环蝶目前报道的分布范围较窄，但根据模拟结果，中国广大地区存在其适宜生境，2 种蝴蝶存在高潜在扩散能力，极易在其自然分布范围以外的适宜地区生存并建立种群。因此，应根据不同适生指数，采取不同放飞方式。结合史军义（2005）的管理措施，研究认为，$HSI \geqslant 50$ 的地区存在成虫扩散的适宜环境条件，不能进行室外放飞。其中，$HSI \geqslant 80$ 的地区严禁引入活体蝴蝶，且在本地放飞时须采取室内或隔离措施进行放飞。$50 \leqslant HSI < 80$ 的地区可少量引入，放飞时也须采取严格隔离措施或开展室内放飞。在 $5 \leqslant HSI < 50$ 的地区可开展限制性室外放飞方式。其中，$30 \leqslant HSI < 50$ 的地区，蝴蝶能四季存活，在放飞前应对蝴蝶采取一定措施，确保其在野外只能存活较短时间；而 $5 \leqslant HSI < 30$ 的地区，在春夏季节且存在合适的寄主或蜜源植物时易存活，可错开其发生的适宜季节，在秋冬开展自由放飞，春夏采取限制性放飞。$HSI < 5$ 的地区，环境条件不适宜，即使存在适宜寄主，也难以存活，可以自由放飞。因此，对于任何一种放飞蝴蝶，在放飞前都应该分析其适宜生境，根据结果采取科学放飞策略。

## 参 考 文 献（References）


Braunisch V, Suchant R, 2007. A model for evaluating the 'habitat potential' of a landscape forcapercaillie *Tetrao urogallus*: a tool for conservation planning. *Wildl. Biol.*, 13: 21–33.

Bryan TL, Metaxas A, 2007. Predicting suitable habitat for deep-water orgonian corals on the Atlantic and Pacific Continental Margins of North America. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 330: 113–126.

Cassinello J, Acevedo P, Hortal J, 2006. Prospects for population expansion of the exotic aoudad (*Ammotragus lervia*; Bovidae) in the Iberian Peninsula: clues from habitat suitability modelling. *Diversity Distrib.*, 12: 666–678.

Gállego D, Cánovas F, Esteve MA, Galián J, 2004. Descriptive biogeography of *Tomicus* (Coleoptera: Scolytidae) species in Spain. *Biogeogr.*, 31: 2 011–2 024.

Hein S, Binzenhöfer B, Poethke HJ, Biedermann R, Settele J, Schröder B, 2007. The generality of habitat suitability models: A practical test with two insect groups. *Basic and Applied Ecology*, 8: 310–320.

Hirzel AH, Hausser J, Chessel, 2002a. Ecological-niche factor analysis: How to compute habitat-suitability maps without absence data. *Ecology*, 83: 2 027–2 036.

Hirzel AH, Hausser J, Perrin N, 2002b. Biomapper 3.2 Lab. for Conservation Biology. University of Lausanne, Switzerland. http://

www.unil.ch/Biomapper.

Hirzel AH，Le Lay G，Helfer V，Randin C，Guisan A，2006. Evaluating the ability of habitat suitability models to predict species presences. *Ecol. Model.*，199：142－152.

Hutchinson GE，1957. Concluding remarks. *Cold Spring Harbor Symp. Quant. Biol.*，22：415－427.

Li BW，Shen Q，Xiong XP，Wei ZT，2005. Bionomics and control techniques of *Stichophthalma howqua*（Westwood）. *East China Forest Management*，19（1）：48－49.［李百万，沈强，熊小萍，魏忠田，2005. 竹箭环蝶的生物学特性及防治技术. 华东森林经理，19（1）：48－49］

Santos X，Brito JC，Sillero N，Pleguezuelos JM，Llorente GA，Fahd S，Parellada X，2006. Inferring habitat-suitability areas with ecological modelling techniques and GIS：A contribution to assess the conservation status of *Viperalatastei*. *Biol. Conserv.*，130：416－425.

Soares C，Brito JC，2007. Environmental correlates for species richness among amphibians and reptiles in a climate transition area. *Biodiv. Conserv.*，16：1 087－1 102.

Shi JY，Zhou CL，Chen XM，2005. Assessment and prevention of invasion risk in live butterfly releasing. *Forest Research*，18（5）：621 －627.［史军义，周成理，陈晓鸣，2005. 蝴蝶异地放飞中的生物入侵风险评估与管理. 林业科学研究，18（5）：621－627］

Yu GR，He HL，Liu XA，Liu D，Wang QF，Ren CY，Li ZQ，Su W，Yue YZ，Fan LS，Guo XB，Zhu QL，Cai F，2004. Atlas for Spatialized Information of Terrestrial Ecosystem in China（Volume of Climatological Elements）. China Meteorological Press，Beijing. 317 pp.［于贵瑞，何洪林，刘新安，刘栋，王秋凤，任传友，李正泉，苏文，岳燕珍，范辽生，郭学兵，祝青林，蔡福，2004. 中国陆地生态系统空间化信息研究图集（气候要素分卷）. 北京：气象出版社. 317 页］

Zaniewski AE，Lehmann A，Overton JM，2002. Predicting species spatial distributions using presence-only data：a case study of native New Zealand ferns. *Ecol. Model.*，157：261－128.

（责任编辑：袁德成）